

## АЕРОПОРТИ ТА ЇХ ІНФРАСТРУКТУРА

УДК 629.7.534.2

**О.І. Запорожець**, д-р техн. наук  
**Г.Г. Голембієвський**

### ВПЛИВ ЕФЕКТІВ УСТАНОВЛЕННЯ ДВИГУНІВ І ПОШИРЕННЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ В АТМОСФЕРІ НА РІВНІ ШУМУ ЛІТАКА В КОНТРОЛЬНИХ ТОЧКАХ

Інститут транспортних технологій НАУ, e-mail: zap@nau.edu.ua

*Розглянуто метод розрахунку впливу стану атмосфери на поширення звукових променів. Проведено аналіз алгоритмів розрахунку траєкторій звукових променів за наявності градієнтів швидкості вітру і температури. Визначено вплив рефракційних властивостей середовища на характеристики поширення звукових променів.*

#### Вступ

Існуючі методи і програмні засоби для розрахунку та прогнозування шуму в околицях аеропортів узагальнені до «стандартної атмосфери». При цьому приймається однорідність та ізотропність навколишнього середовища для поширення звукових хвиль, траєкторії променів яких являють собою прямі лінії.

У реальній атмосфері поширення звукових хвиль відрізняється від сферичної форми, що обумовлено такими чинниками:

- поглинання звуку в повітрі, яке відрізняється в різних напрямках;
- неоднорідність середовища поширення, яка зумовлена метеорологічними умовами (рефракція і турбулентність);
- взаємодія з землею поверхнею.

Результати деяких досліджень в реальній атмосфері показали необхідність обліку метеорологічних умов [1; 2]. Примітно, що навіть на відстані двадцяти п'яти метрів від джерела (літака) шуму погрішність може складати до 20 дБ, якщо не бралися до уваги (метеорологічні) погодні умови.

Зазначені ефекти відбуваються при оцінці рівнів шуму в контрольних точках сертифікації літаків відповідно до вимог міжнародних та національних стандартів [3; 4].

#### Рефракція звукових променів

Рефракція (заломлення) звукових променів відбувається, якщо температура повітря і/або швидкість вітру (їх градієнти по висоті) змінюються на шляху поширення променів.

Температура повітря і швидкість вітру впливають на зміну швидкості звуку, і саме вона є причиною рефракції.

При збільшенні градієнта швидкості вітру і віддаленому розташуванні приймача звуку можна спостерігати більше за одне відбивання звукового променя від поверхні землі (рис. 1).

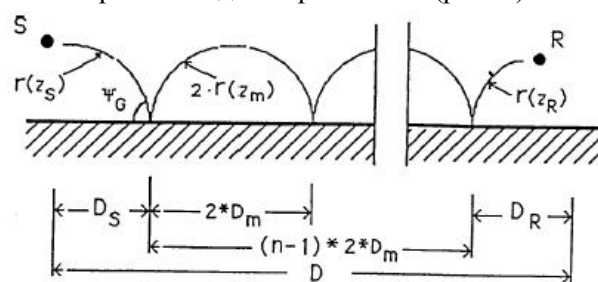


Рис. 1. Багаторазове відбивання звукового променя від земної поверхні

Положення першого відбивання  $x$  визначається через розв'язання рівняння четвертого порядку [5]:

$$n \cdot (n+1) \cdot x^4 - (2n+1) \cdot D \cdot x^3 + [b_i^2 + (2n^2 - 1) \cdot b_s^2 + D^2] \cdot x^2 - (2n-1) \cdot b_s^2 \cdot D \cdot x + n \cdot (n-1) \cdot b_s^4 = 0,$$

де  $D = D_S + D_R + 2(n-1)D_M$ ;  $b_i^2 = z_i(2+az_i)/z_s$ ;  $i = R$ ;  $n$  – порядок променя відбивання, який визначається кількістю відбивань;  $R$  – приймач звуку або  $i = S$  – джерело звуку.

Для кожного  $i$ -го відбивання геометричні параметри та час розраховуються таким чином (всі параметри показані на рис. 1):

$$r_i = 2(n-1)r(z_m) + r(z_R) + r(z_S);$$

$$\tau_i = 2(n-1)\tau(z_m) + \tau(z_R) + \tau(z_S).$$

При попутному (до поширення звукових хвиль) вітрі і/або температурній інверсії (підвищенні температури з висотою над землею поверхнею або градієнт швидкості вітру позитивний) звукові промені згинаються донизу (рис. 2,а), а при зустрічному вітрі і/або при

пониженні температури з висотою або градієнт швидкості негативний – вгору (рис. 2,б).

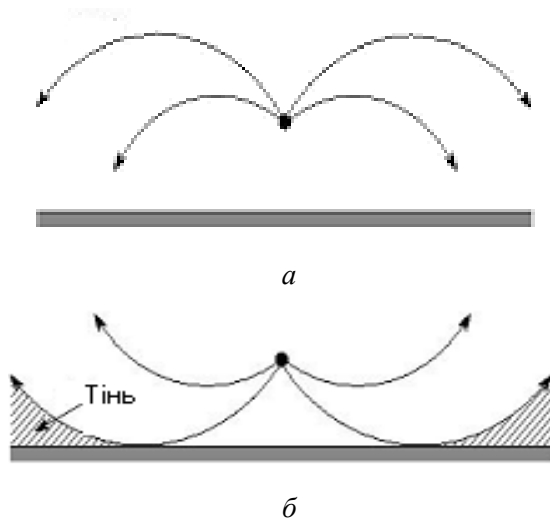


Рис. 2. Згин звукових променів донизу, якщо температура падає (а), угору, якщо температура зростає (б) з висотою

Промені відбиваючись, утворюють зони звукової тіні.

За умов зустрічного вітру і/або при пониженні температури утворюються області, відомі як зони звукової тіні (рис. 2,б), куди не попадає звуковий промінь.

Температурний градієнт і градієнт вітру в напрямі поширення звуку посилюють рефракцію звукових хвиль.

Розрахункова ефективна швидкість звуку включає в себе швидкість звуку в повітрі і швидкість вітру в напрямі поширення звуку:

$$c(z) = A \ln \left( \frac{z}{z_0} + 1 \right) + Bz + C,$$

де  $A$  – коефіцієнт складової швидкості звуку, що визначається вітром:

$$A = \frac{u(z)}{\ln \left( \frac{z}{z_0} + 1 \right)},$$

$B$  – коефіцієнт температурної складової швидкості звуку:

$$B = \frac{dt}{dz} \frac{10.025}{\sqrt{t + 273.15}}.$$

Виконуючи розрахунки, будемо вважати градієнти лінійними, при цьому:

$$c(z) = c_0 (1 + az),$$

де  $c$  – швидкість звуку відносно землі;  $c_0$  – швидкість звуку на поверхні землі;  $z$  – висота від поверхні землі;  $a$  – константа градієнта швидкості.

Таке припущення дозволяє отримувати прості аналітичні рішення траєкторії променя і відповідні параметри траєкторії.

При зміні умов рефракції змінюються кривизна та довжина траєкторії звукових хвиль, які пересікаються в точці приймача.

Залежно від співвідношення фаз між цими хвилями деякі частоти будуть посилені, а інші пригнічені.

Рефракція впливає на рівень шуму.

Кут нахилу звукових променів  $\psi_G$  (рис. 1) змінюється у поверхні землі і може бути розрахований як:

$$\psi_G = \arctg \left[ \frac{aD}{2} + \frac{z_R(2 + az_R)}{2D} \right],$$

$$a = \frac{1}{c_0} \frac{dc}{dz} = \frac{1}{R_c},$$

де  $R_c$  – радіус кривизни траєкторії звукового променя.

Залежність довжини криволінійної траєкторії променя  $r(z_R)$  і часу поширення звуку  $\tau(z_R)$  можна отримати з таких співвідношень:

$$r(z_R) = \frac{1}{a \cos \psi_G} \left[ \arcsin \{ \Omega \} - \frac{\pi}{2} + \psi_G \right];$$

$$\tau(z_R) = \frac{1}{2ac_G} \log \left[ \frac{f(0)}{f(z_R)} \right];$$

$$\Omega = (1 + az_R) \cos \psi_G,$$

де  $c_G$  – швидкість звуку біля джерела ( $c_G = c_0$ ).

При цьому  $f(z)$  визначається як:

$$f(z) = \frac{1 + \sqrt{1 - (1 + az)^2 \cos^2 \psi_G}}{1 - \sqrt{1 - (1 + az)^2 \cos^2 \psi_G}}$$

Розрахунок звукового тиску  $p$  у приймачі повинен урахувати сумарний вплив різних прямих і відбитих променів. Для кожної траєкторії  $i$ -го променя можна використати формулу для сферичного джерела:

$$p(i) = \sqrt{\frac{\rho c W}{4\pi}} \frac{R_i^n \alpha_i \exp(-j\omega\tau_i)}{r_i},$$

де  $n(i)$  – кількість відбивань  $i$ -го променя від поверхні землі;  $\alpha_i$  – коефіцієнт атмосферного поглинання для  $i$ -го променя;  $R_i$  – коефіцієнт відбивання, який залежить від кута відбивання.

Розрахунок числа можливих звукових променів  $N$ , що досягають приймача при лінійному профілі швидкості звуку в атмосфері, виконується залежно від відстані поширення звуку  $d$ , висот  $h_s$  і  $h_r$ , градієнта швидкості звуку  $a$ :

$$N = 2 \left( \left\lceil \frac{d - l_1}{2l} \right\rceil + \left\lceil \frac{d - l_2}{2l} \right\rceil \right) + 2,$$

де

$$l = \sqrt{h_r^2 + 2h_r / a};$$

$$l_1 = \sqrt{(h_r + a^{-1})^2 - (h_s + a^{-1})^2},$$

$$l_2 = 2l - l_1.$$

Звукові промені при лінійному профілі швидкості звуку в атмосфері можна поділяти за їх порядком.

Промені одного порядку мають однакову кількість відбивань від поверхні землі. Порядок променя може бути розрахований за його номером  $N$  за формулою

$$n = \left\lceil \frac{N - 1}{4} \right\rceil + 1.$$

Безліч можливих акустичних хвиль, які можуть утворитися між джерелом і приймачем, викликає зростання рівня звуку в точці приймача (рис. 3).

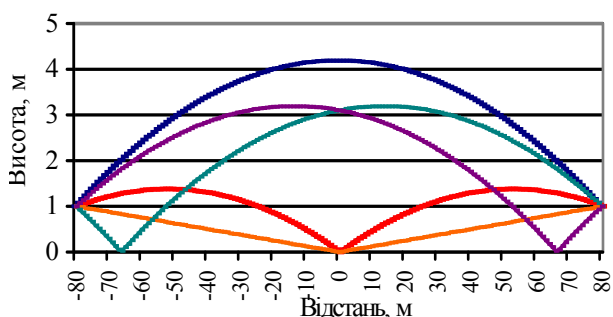


Рис. 3. Поширення прямого і відбитих променів

Отримані траєкторії прямих і відбитих променів визначені для таких параметрів:

- дальність  $R_0 = 190$  м;
- висота джерела  $h_s = 1$  м;
- висота приймача  $h_r = 1$  м;
- коефіцієнт атмосферного поглинання  $a = 0,001$ .

Для однорідної атмосфери довжини прямого та відбитого променів  $R_1 = 190$  м і  $R_2 = 190,01$  м відповідно.

Кут падіння відбитого від земної поверхні променя  $\Theta$  дорівнює  $89,4^\circ$ .

В умовах рефракції атмосфери геометричні параметри променів наведені в таблиці.

Значення довжин і кута падіння відбитих променів

Номер променя	Точка відбивання, м	$R_1$ , м	$R_2$ , м	Кут падіння, град
1	95,0	190,28	190,08	86,7
2	11,2	190,28	190,28	84,6
3	178,8	190,28	190,28	84,6

Вплив землі для відповідних променів показаний на рис. 4.

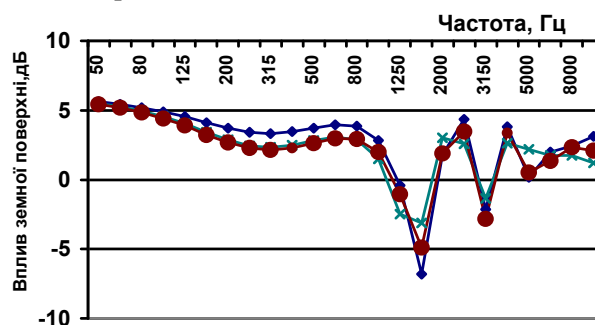


Рис. 4. Вплив землі на ослаблення поширення звуку

Різниця між значеннями впливу для окремих викривлених променів є несуттєвою.

У випадку з негативним градієнтом швидкості вітру (рис. 2,б) звуковий промінь, торкаючись землі, після відбивання розмежовує тінюву зону. Вище за цей промінь звукова область визначена правилами геометричної акустики, тоді як нижче за цей промінь утворюється область звукової тіні.

Турбулентність атмосфери сприяє розсіюванню шуму в зонах звукової тіні і викликає коливання фази та амплітуди звукових хвиль, так руйнуючи інтерференцію між різними променями, що вони досягають приймача. Це призводить до підвищення рівня шуму порівняно з очікуваним для частот, коли вплив землі робить його максимальним. Впливом турбулентності можна на поширення звукових променів знехтувати для звуку низьких частот і при віддаленні до декількох сотень метрів.

### Результати для сертифікаційних точок

Для сертифікаційних точок в умовах рефракції звукових хвиль в атмосфері характерно таке:

- для точки 1 [3] висота літака над землею ще невелика, тому кількість можливих відбитих звукових променів  $N$  може бути більше за один;
- для точок 2 (набір висоти літаком) і 3 (зниження літака перед посадкою) [3] співвідношен-

ня висоти літака над землею та відстані обумовлює наявність одного відбитого променя, який утворює відбивання від поверхні у точці, що є найближчою до точки відбивання променя в однорідній атмосфері.

Утворення рефракції зумовлює зниження експозиції шуму, що утворюється окремими прольотами літаків.

На рис. 5 показано залежності рівнів звуку  $L_A$  в точці 2 для літака з трьома двигунами для різних умов рефракції.

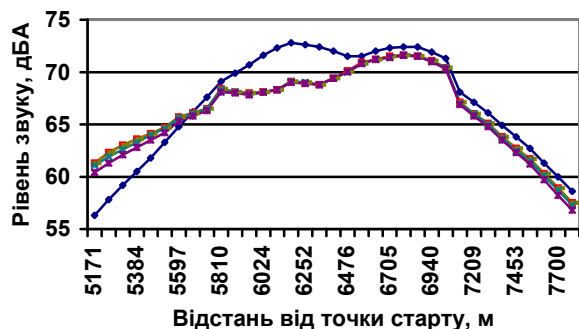


Рис. 5. Рівень звуку  $L_A$  в точці 2 – для різних умов рефракції:  
◆ – рефракція відсутня

З рис. 5 видно, що рефракція знижує рівень експозиції шуму. Даний ефект обумовлений збільшенням відстаней поширення звуку (довжин звукових променів), зміною кутів падіння й ефектів впливу землі тощо.

## Висновки

При розповсюдженні шуму в неоднорідній атмосфері створюються умови, за яких рівні звуку в контрольних точках відрізняються від значень для однорідної атмосфери, тому розрахунки рівнів звуку необхідно виконувати з їх урахуванням.

## Список літератури

1. Запорожец А.И., Голембиевский Г.Г. Влияние эксплуатационных факторов на уровни авиационного шума // Вісн. КМУЦА. – 2000. – № 3–4. – С. 146–152.
2. Запорожець О.І., Токарев В.І., Голембієвський Г.Г. Дослідження розрахункових моделей ефектів встановлення двигунів на рівні шуму літака на місцевості // Вісн. НАУ. – 2003. – № 3–4. – С. 146–152.
3. *Environmental protection. Annex 16 to the Convention on International civil aviation. Aircraft noise. Vol. 1.* – ICAO. – 1993. – 93 p.
4. *ГОСТ 17229-87. Самолеты пассажирские и транспортные. Методы определения уровней шума, создаваемого на местности.* Введен с 01.07.1988. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 46 с.
5. *Embleton T.F.W., Thiessen G.J., Piercy J.E. Propagation in Inversion and Reflections at the Ground* // JASA. – 1976. – Vol. 59, № 2. – P. 128–142.

Стаття надійшла до редакції 05.07.04.

А.И. Запорожец, Г.Г. Голембиевский

Влияние эффектов установки двигателей и распространения звуковых волн в атмосфере на уровни шума самолета в контрольных точках

Рассмотрен метод расчета влияния состояния атмосферы на распространение звуковых лучей. Осуществлен анализ алгоритмов расчета траекторий звуковых лучей при наличии градиентов скорости ветра и температуры. Определено влияние рефракционных свойств среды на характеристики распространения звуковых лучей.

О.І. Запорожець, Г.Г. Голембієвський

Engine installation and sound propagation effects on aircraft noise levels in control points

Calculation method for assessment of the atmosphere influence on sound propagation is considered. The algorithm of sound ray path is analyzed in presence of wind velocity and temperature gradients for sound refraction parameters of the environment.